

# PMSM의 고장허용 운전시 토크 리플 저감 기법의 동기좌표계 구현

변병주, 조영훈, 임종웅, 최규하  
 건국대 전기공학과 전력전자연구실(KOPEL)

## A Torque Ripple Mitigation Strategy of Fault-Tolerant PMSM Drive in Synchronous Reference Frame

Byeng Joo Byen, Y.H. Cho, J.Y. Lim, G.H. Choe  
 Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ.

### Abstract

본 논문은 3상 PMSM 동작 중 한 개의 상이 고장이 났을 경우, 2상을 통하여 고장허용 동작을 하는데 있어서 발생하는 토크 리플 저감 방법에 대하여 연구를 하였다. 기존의 방법들이 기본과 주파수로 회전하는 동기좌표계상에서 전향 보상 방식으로 교류 성분의 전류를 제어함으로써 토크 리플을 보상하는 데에 반해 제안한 방법은 기본과 주파수의 2배수로 회전하는 동기좌표계상에서 직류 성분의 전류로 토크 리플을 보상하기 때문에, 저속 운전뿐만 아니라 고속 운전시에도 그 보상 특성이 매우 우수하다. 제안한 방법은 자동차용 전동식 조향 시스템에 적용하여 그 유효성을 실험적으로 검증하였다.

### 1. 서 론

PMSM은 빠른응답성, 고토크, 고효율과 같이 고성능을 요구하는 산업현장에서 많이 쓰이고 있다. 또한 서보모터 드라이브, 로봇용 분야, 핵발전소, 비행기, 자동차와 같은 곳에서 많이 이용되고 있다. 이런 현장들은 구동 드라이브의 높은 신뢰성이 요구되고, 이러한 신뢰성은 드라이브의 자체의 신뢰성뿐만 아니라 사고 후 동작에 관하여 모두 요구되어 진다. PMSM 구동 드라이브에서 발생하는 사고는 상 단락이나 상 개방 두 가지로 나눌 수 있다. 상 단락의 경우 시스템의 동작은 불가능하기 때문에 발생하면 시스템이 정지되어야 한다. 그러나 상 개방의 경우 시스템의 구성에 따라서 나머지 두개의 상으로도 동작이 가능하기 때문에 구동 드라이브에서 상 개방이 된 경우에도 신뢰성을 향상시키기 위해서는 이전과 같이 동작이 가능하도록 요구되어 진다.

모터 드라이브에서 상 개방이 발생하였을 때, 지속적으로 동작을 하기 위해서는 PMSM의 중성선을 이용하는 제어기법을 이용하게 된다. 이 때 나머지 두개의 상을 통하여 고장허용 동작을 하게 되면 모터의 토크와 속도에서 리플이 발생하게 되며, 이는 소음을 발생시킨다. 따라서 이에 대한 보상방법이 요구되고 있다[1 2].

본 논문에서는 3상 4레그 인버터를 사용하여, 고장허용 동작시 발생하는 리플을 보상하는 방법에 대하여 연구하였다. 리플을 보상하는 방법은 기본과 주파수의 2배를 추출하여 동기좌표계에서 보상하였고, 이를 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다. 또한 PMSM를 이용하는 전동식 조향 시스템에 적용하여 성능을 검증하였다.

### 2. 제안된 보상 기법

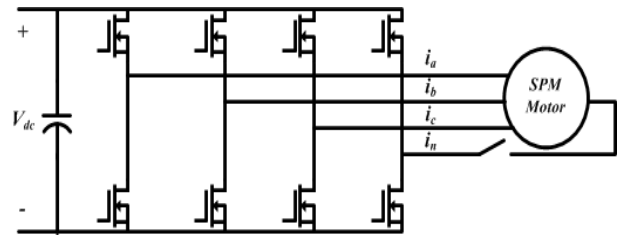


그림 1 PMSM 고장허용 시스템  
 Fig. 1 PMSM fault tolerant drive scheme

그림 1은 본 논문에서 사용하는 3상 4레그의 토폴로지를 나타내었다. 여기서 a, b, c, 상 중 한 개의 상이 개방이 되면, n상이 불게 되고 이전과 같이 고장허용 동작을 하게 된다. 이 때 아래 식과 같이 동기좌표계의 d, q축에서 기본과 성분 외에 리플성분이 발생하게 된다[1].

$$i_d = -k \cos 2\theta \quad (1)$$

$$i_q = M + k \cos 2\theta \quad (2)$$

$$i_{dq} = \sqrt{M^2 + 2MK \cos 2\theta + 2(k \cos 2\theta)^2} \quad (3)$$

여기서, k는 제 2 고조파성분의 크기, M은 전류의 기본과 성분의 크기이다. 이때, 그림 2에서와 같이 식 (3)의  $i_{dq}$ 의 값으로부터 기본과의 2배의 성분을 추출할 수 있고, 이를 동기좌표계상에서 d, q축으로 만들어 출력이 0이 되도록 제어하여 전류 제어기의 출력에 전향보상을 한다. 이를 사용하여 기본과의 2 고조파의 성분을 제거할 수 있게 된다.

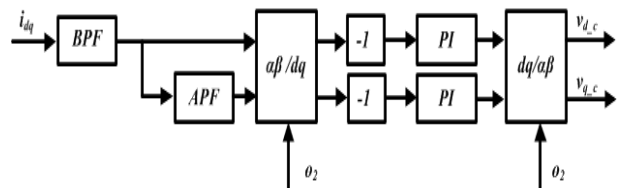


그림 2 제안된 제어알고리즘  
 Fig. 2 Proposed control algorithm

### 3. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 알고리즘을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 그림 3과 4는 제안하는 알고리즘의 적용 전과 후를 나타내고 있다. 그림 3은 제안하는 알고리즘을 적용하기 전으로, 500rpm 으로 동작하고 있을 때 식 (3)의  $i_{dq}$ 와 모터의 속도를 나타내고 있다. 보상 알고리즘을 적용하기 전의 상태에서는  $i_{dq}$ 와 속도에 리플성분이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 동일한 상황에서 제안하는 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 파형이다. 여기서 적용하기 전과 비교했을 때 전에 존재 하던 리플이 약 70[%] 이상 제거 된 것을 확인 할 수 있다.

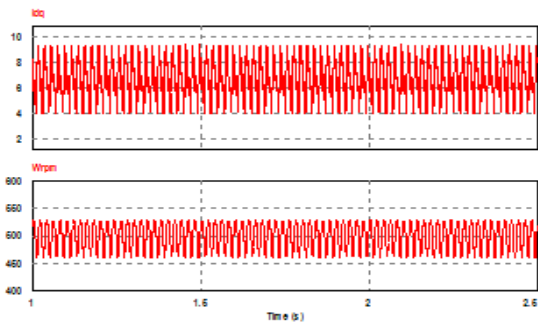


그림 3 보상 알고리즘 적용 전 시뮬레이션 파형  
Fig. 3 Simulation waveform without compensation algorithm

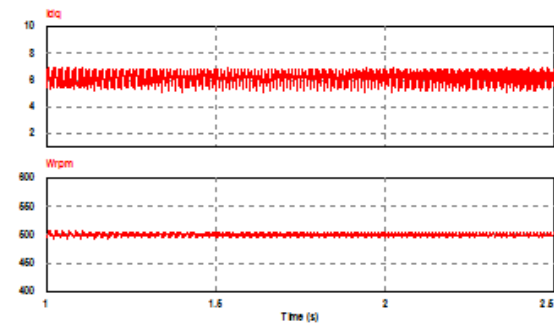


그림 4 보상 알고리즘 적용 후 시뮬레이션 파형  
Fig. 4 Simulation waveform with compensation algorithm

### 4. 실험 및 결과 분석

본 논문에서 제안하는 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 같이 속도제어를 하여 실험을 진행하였다. 사용된 시스템의 사양은 다음과 같다. 마이크로프로세서는 프리스케일에서 나오는 MPC5643 이고, 3상 4레그 인버터의 정격 입력전압은 12V, 정격 전력은 1.5kW, 스위칭 주파수는 20kh로 선정하였다. 그림 5와 6은 500rpm에서 고장 허용 실험을 하였을 때의 보상 알고리즘 적용 전과 후의 파형이다. 그림 5는 보상하기 전의 파형으로  $i_{dq}$  축의 리플성분이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있고, 또한 속도에도 리플이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 6은 보상 알고리즘을 적용 했을 때의 파형으로, 보상하기 전과 비교했을 때  $i_{dq}$ 와 속도에서 약 60[%]이상의 리플이 제거되는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문은 3상 4레그 인버터에서 한 개의 상이 개방되었을 때 고장 허용 동작시 발생하는 리플을 보상하는 알고리즘에 대한 연구를 하였다. 여기서 제안하는 보상 알고리즘은 동기좌표계 상에서 제어를 하는 방식을 사용하며, 보상하고자 하는 대상은 기존에 발생하는 리플성분을 분석을 하여 정의를 하였다. 또한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 보상하기 전에 비하여 약 60[%] 이상의 리플 저감이 가능하다는 것을 확인할 수 있었고, 이를 통하여 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하였다.

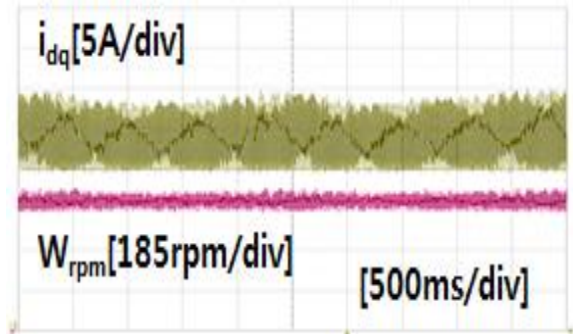


그림 5 보상 알고리즘 적용 전 실험 파형  
Fig. 5 Experimentation waveform without compensation algorithm

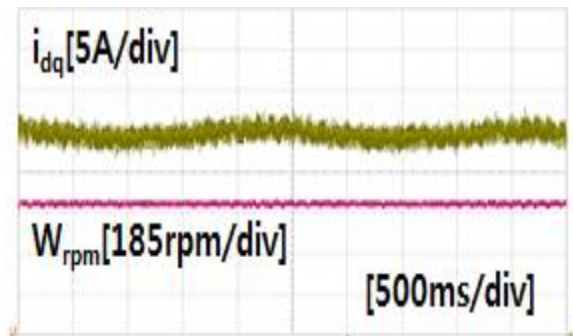


그림 6 보상 알고리즘 적용 후 실험 파형  
Fig. 6 Experimentation waveform with compensation algorithm

### 참 고 문 헌

- [1] N. Bianchi, S. Bolognani, M. Zigliotto, M. Zordan, "Innovative Remedial Strategies for Inverter Faults in IPM Synchronous Motor Drives", Ieee Transaction on Energy Conversion, vol. 18, no. 2, June 2003
- [2] A. Khlaief, M. Boussak, M. Gossa, "Open phase faults detection in PMSM drives based on current signature analysis", XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 6 8, Sept. 2010